Engng.J.CMU.(2015) 22 (2), 47−58

วารสารวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Engineering Journal
Chiang Mai University

การเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลจากกระบวนการกลั่นด้วยรังสีอาทิตย์โดยใช้สารดูดซับ

Increase of Ethanol Concentration from Solar Distillation by an Adsorbent

จารุวัฒน์ เจริญจิต[1] จิรวรรณ เตียรถ์สุวรรณ[1*] กานดา ว่องไวลิขิต[2] และ ปิยะ เสียงสุคนธ์[1]

Jaruwat Jareanjit[1] Jirawan Tiansuwan[1*] Kanda Wongwailikit[2] and Piya Siangsukone[1]

[1]สายวิชาเทคโนโลยีอุณหภาพ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140

[2]ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ปทุมธานี 12000

[1]Division of Thermal Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140 Thailand

[2]Department of Chemistry, Faculty of Science, Rangsit University, Pathumtani12000 Thailand

[*]Corresponding author: jirawan.tia@kmutt.ac.th

Telephone Number 02-470-86120, Fax. Number02-427-9062

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ เป็นการทดสอบการเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลโดยสารดูดซับ จากสารผสมเอทานอล-น้ำ ที่ได้จากกระบวนการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์ สารดูดซับจะเป็นโมเลกุลาร์ซีฟ ชนิด 3A บรรจุในชั้นดูดซับ ซึ่งติดตั้งระหว่างผิวระเหย และผิวกลั่นตัว ของถังต้มกลั่นต้นที่ มีลักษณะเช่นเดียวกับถังต้มกลั่นจากภูมิปัญญาพื้นบ้าน ทั้งนี้กระบวนการในการเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง ในแต่ละครั้งจะใช้สารละลายเอทานอลเริ่มต้นที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยมีปริมาตร 10 ลิตร ความร้อนที่ใช้ในกระบวนการมาจากตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบขนาด 2 ตารางเมตร การแยกเอทานอล จากสารผสมที่ความเข้มข้นต่างๆ จะถูกทดสอบ ผลการศึกษาพบว่าระบบสามารถกลั่นเอทานอลความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 10, 32, 72 และ 84%v/v เพิ่มขึ้นเป็น 74.7, 89.4, 97 และ 96.3%v/v เทียบกับ 48.6, 72.3, 86.5 และ 89.7%v/v ตามลำดับ ของกรณีที่เป็นการต้มกลั่น โดยไม่มีสารดูดซับ

ABSTRACT

The present investigation was to increase ethanol concentration in ethanol-water vapor from a solar ethanol distillation by a 3A molecular sieve packed bed installed between evaporative and condensing sections of a 10 liter brewery tank. The brewery tank was designed similar to that of a local Thai Wisdom unit. The heating source came from a 2 m^2 flat plate solar collector. The study was carried out with a 10 liter batch of solution with various initial ethanol concentrations. From the experiments, it could be found that with the initial concentrations of 10, 32, 72 and 84%v/v, the output yields were 74.7, 89.4, 97 and 96.3%v/v compared with 48.6, 72.3, 86.5 and 89.7%v/v, respectively, from the system without the adsorbent.

Received 19 May 2014
Accepted 10 June 2014

1. บทนำ

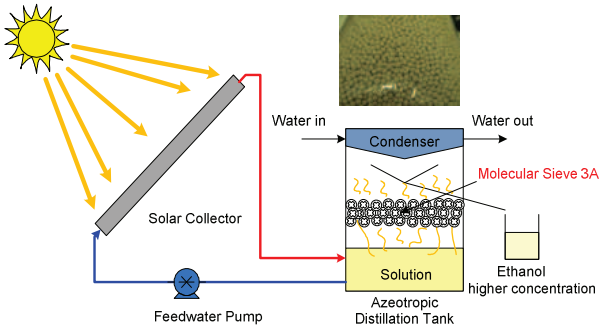
ปัจจุบันเอทานอลถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งด้านเชื้อเพลิงสะอาด [1, 2] ในรูปแบบต่างๆ ทั้งทางตรงและทางอ้อม โดยกระบวนการทั่วไปในการผลิตเอทานอลเริ่มจากการหมักผลผลิตทางการเกษตร โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้น 8-10%v/v [3] และนำเข้าสู่กระบวนการกลั่นลำดับส่วน เพื่อเพิ่มความเข้มข้น อย่างไรก็ตามเอทานอลที่สามารถนำมาผสมกับน้ำมันชนิดอื่น เพื่อผลิตแก๊สโซฮอลได้ จะต้องมีความเข้มข้นไม่ต่ำกว่า 99.5%v/v ซึ่งกระบวนการกลั่นลำดับส่วน จะกลั่นได้ที่ความเข้มข้นไม่เกิน 95%v/v

การเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลจาก 95%v/v เป็น 99.5%v/v สามารถดำเนินการได้หลายวิธีได้แก่ การสกัดเอทานอลด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ [4] การสกัดด้วยตัวทำละลาย [5, 6] กระบวนการดูดซับ [7-9] และกระบวนการเพอแวปพอเรชัน (pervaporation) [10-12] ในกระบวนการดูดซับ จากสมบัติของขนาดโมเลกุลและขั้วที่แตกต่างกันระหว่างเอทานอลและน้ำ [13] ส่งผลให้กระบวนการดูดซับค่อนข้างมีแนวโน้มที่จะลดการใช้พลังงานอย่างมีนัยสำคัญ [14] ในการดูดซับน้ำด้วยสารดูดซับที่ได้จากธรรมชาติ เช่น แป้ง [15, 16] และสารดูดซับที่เกิดจากการสังเคราะห์ สำหรับชนิดหลัง โมเลกุลาร์ซีฟซึ่งเป็นสารประเภทซีโอไลต์สังเคราะห์ [$(K_2O.Na_2O).Al_2O_3.2SiO_2.xH_2O$] [17] ได้มีการผลิตโดยแต่ละชนิดมีความแตกต่างที่ขนาดของรูพรุน ทำให้ความสามารถในการดูดซับแตกต่างกัน โดยทั่วไปในอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลไร้น้ำ จะนิยมใช้โมเลกุลาร์ซีฟ ชนิด 3A ที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 3 อังสตรอม ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดโมเลกุลของเอทานอล แต่มีขนาดใกล้เคียงกับน้ำ ส่งผลให้มีสมบัติพิเศษในการดูดซับน้ำในสภาวะที่อุณหภูมิต่ำ และคายน้ำออกเมื่อได้รับความร้อน [18, 19] ดังนั้น เมื่ออิ่มตัวด้วยไอน้ำก็จะนำไปทำการอบคืนสภาพ (regeneration) เพื่อไล่ไอน้ำออก สามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้อีก

จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีการประยุกต์รังสีอาทิตย์มาใช้ในกระบวนการกลั่นแบบไม่ต่อเนื่อง [20-23] เพื่อช่วยลดการใช้พลังงานในกระบวนการผลิต [24, 25] รวมถึงการดูดซับความชื้นสำหรับอบแห้ง [26-27] และอบคืนสภาพโมเลกุลาร์ซีฟ ชนิด 3A โดยใช้รังสีอาทิตย์ [28] โดยสามารถลดความชื้นจาก 49.33%(d.b.) เหลือ 12.33%(d.b.) ภายในเวลา 4 วัน (ชั่วโมงทำงานรวม 24 ชั่วโมง)

โดยทั่วไปการกลั่นด้วยรังสีอาทิตย์แบบไม่ต่อเนื่องในการกลั่นขั้นตอนที่ 1 จากความเข้มข้นเริ่มต้น 10%v/v ผลผลิตที่กลั่นได้จะมีความเข้มข้นได้ไม่เกิน 53%v/v จาก vapour-liquid equilibrium diagram [29] ดังนั้นจะต้องทำการกลั่นซ้ำอีก 3-4ขั้นตอน จึงจะได้ความเข้มข้นประมาณ 95%v/v ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะลดขั้นตอน โดยศึกษาความเป็นไปได้ในการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลจากกระบวนการกลั่นด้วยรังสีอาทิตย์ ด้วยการแยกเอทานอลจากสารผสม (เอทานอล-น้ำ) ด้วยโมเลกุลาร์ซีฟ ชนิด 3A โดยใช้รังสีอาทิตย์เป็นแหล่งความร้อนหลัก ในกระบวนการต้มกลั่น ทั้งนี้ถังต้มกลั่น จะมีลักษณะเช่นเดียวกับเตาต้มกลั่นสุราพื้นบ้าน ความเข้มข้นของเอทานอลที่กลั่นได้จากระบบ จะเปรียบเทียบกับการกลั่นปกติ

2. หลักการทำงาน



รูปที่ 1 การแยกเอทานอลจากสารผสมเอทานอล-น้ำโดยสารดูดซับในกระบวนการต้มกลั่นเอทานอลด้วยพลังงานแสงอาทิตย์

2.1 ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ

กรณีระบบอยู่ในสภาวะคงตัว อัตราความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสีอาทิตย์ โดยประยุกต์ใช้สมการของ Hottel-Willier - Bliss [30] จะคำนวณจาก

$$q_c = A_c F_R[I_T(\tau\alpha)_e - U_L(T_{fi} - T_a)] \quad (1)$$

โดยที่ A_c คือพื้นที่ของตัวเก็บรังสี (m^2), F_R คือแฟคเตอร์การนำความร้อนมาใช้ของตัวเก็บรังสี, I_T คือค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ (W/m^2), q_c คืออัตราความร้อนจากตัวเก็บรังสี (W), T_a คืออุณหภูมิอากาศรอบๆ (°C), T_{fi} คืออุณหภูมิของสารละลายไหลเข้า (°C), U_L คือสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนรวม (W/m^2°C), $(\tau\alpha)_e$ คือผลคูณประสิทธิผลของค่าส่งผ่านและค่าดูดกลืนรังสี

กรณีที่สารทำงานไม่มีการเปลี่ยนสถานะ อัตราความร้อนสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$q_c = mC_{pw}(T_{fo}-T_{fi}) \quad (2)$$

โดยที่ C_{pw} คือความจุความร้อนจำเพาะของสารทำงาน (kJ/kg °C), m คืออัตราการไหลเชิงมวลของทำงานในตัวเก็บรังสีอาทิตย์ (kg/s), T_{fo} คืออุณหภูมิของสารละลายไหลออก (°C)

2.2 การหาอัตราพลังงานความร้อนในถังต้มกลั่น

อุณหภูมิของสารทำงานในถังต้มกลั่นสามารถหาได้จากการสมดุลพลังงานทางความร้อนโดยสมมุติให้ถังเก็บสะสมมีอุณหภูมิสม่ำเสมอและไม่มีการแยกชั้นของอุณหภูมิของของไหล (Non-Stratified Tank) และสมมุติว่าไม่มีการสะสมพลังงานในตัวรับรังสี ดังนั้นการสมดุลพลังงานที่ถังต้มกลั่นสามารถเขียนได้เป็น

อัตราพลังงานความร้อนในถัง = อัตราพลังงานความร้อนที่ได้จากตัวเก็บรังสี - อัตราพลังงานความร้อนที่สูญเสียจากถัง

$$(MC_p)_S dT_s/d\,t = A_C F_R[I_T(\tau\alpha)_e - U_L(T_{fi}-T_a)] - (UA)_s(T_s-T_a) \quad (3)$$

โดยที่ $(UA)_S$ คือผลคูณของสัมประสิทธิ์การสูญเสียความร้อนจากถังและพื้นที่ผิวของถัง (W/°C), $(MC_p)_S$ คือผลคูณของมวลและความจุความร้อนจำเพาะของสารละลายในถัง (kJ/°C), T_s คืออุณหภูมิเฉลี่ยของสารละลายในถังต้มกลั่นในช่วงเวลาที่พิจารณา (°C), Δt_i คือผลต่างเวลาที่ใช้คำนวณอุณหภูมิสารละลาย (s)

สมการ (3) สามารถใช้หาอุณหภูมิสารละลายในถังสะสมเมื่อสารละลายดังกล่าวถูกป้อนไปรับความร้อนที่ตัวเก็บรัสีอาทิตย์ในช่วงเวลาต่างๆ ได้ดังนี้

$$T_s^+ = T_s + [\Delta t/(MC_p)_s][[A_C F_R[I_T(\tau\alpha)_e - U_L(T_s-T_a)] - (UA)_s(T_s-T_a)) \quad (4)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิสารละลายจะมีค่าสูงขึ้นตามค่าความเข้มรังสีอาทิตย์ และถ้าสารละลายมีอุณหภูมิถึงจุดเดือด ค่า $(MC_p)_s$ จะเข้าใกล้ค่าอนันต์ อุณหภูมิจะค่อนข้างคงที่

2.3 ประสิทธิภาพการดูดซับน้ำของสารดูดซับ

สารดูดซับที่ใช้จะจับน้ำไว้และให้ไอเอทานอลทะลุผ่าน ดังนั้นความสามารถในการดูดซับน้ำจะพิจารณาจาก

$$E_{ff} = \frac{water_{eq} - water_{product}}{water_{eq}} = \frac{water_{adsorbed}}{water_{eq}} \quad (5)$$

โดยที่ E_{ff} คือประสิทธิภาพการดูดซับน้ำของระบบ, $water_{eq}$ คือปริมาณหรือมวลของน้ำในกระบวนการกลั่นที่สภาวะสมดุลเฟสไอ-ของเหลว (equilibrium) สำหรับการอ้างอิงสภาวะเริ่มต้นกรณีที่ไม่มีการดูดซับน้ำโดยสารดูดซับ, $water_{product}$ คือปริมาณหรือมวลของน้ำในสารละลายที่ได้จากการกลั่นโดยใช้สารดูดซับ และ $water_{adsorbed}$ คือปริมาณหรือมวลของน้ำที่ถูกดูดซับไปจากระบบเป็นผลต่างระหว่าง $water_{eq}$ และ $water_{product}$ โดยสารดูดซับ ตามลำดับ

การทำงานของระบบ ใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ เป็นแหล่งแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างรังสีอาทิตย์กับสารละลายในถังกลั่นซึ่งออกแบบให้ชุดควบแน่น ชั้น

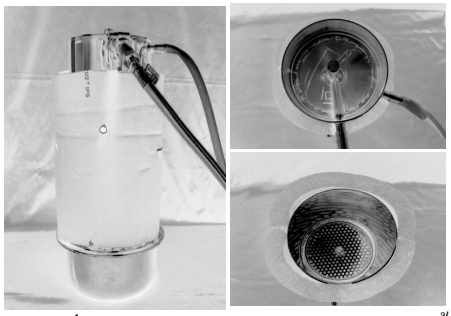
ดูดซับ และส่วนการระเหยอยู่ในหน่วยเดียวกัน โดยใช้ปั๊มหมุนเวียนสารละลาย ในระบบ ที่อัตราการไหล 2.5 l/min ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1 เมื่อสารละลายอุณหภูมิสูงขึ้น ก็จะระเหยตัว ในอัตราที่ต่างกัน จากความดันไอที่เพิ่มขึ้นจากผลของอุณหภูมิที่ได้จากรังสีอาทิตย์ที่อุณหภูมิประมาณ 70-80^{o}C และไอผสม (เอทานอล-น้ำ) จะระเหยผ่านถาดดูดซับ (fixed bed) ซึ่งติดตั้งระหว่างผิวระเหยและผิวกลั่นตัว เนื่องจากขนาดรูพรุนของ molecular sieve ชนิด 3A เล็กกว่าโมเลกุลของเอทานอล ทำให้เอทานอลไม่สามารถแพร่เข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลาร์ซีฟ ดังนั้นจึงมีเพียงน้ำเท่านั้นที่จะถูกดูดซับออกไป ทำให้แยกไอน้ำออกจากไอเอทานอลได้ระหว่างการดูดซับ โดยไอส่วนที่เหลือจากการดูดซับ จะลอยตัวผ่านถาดดูดซับ ไปยังผิวควบแน่นส่วนบนของถังกลั่น โดยธรรมชาติในภาชนะปิด ซึ่งไอผสมจะกลั่นตัวบริเวณผิวด้านในของ ซึ่งมีอุณหภูมิต่ำกว่าผิวระเหย เนื่องจากสามารถระบายความร้อนสู่น้ำหล่อเย็น ต่อเนื่อง และไหลไปยังรางน้ำ ออกจากเครื่องกลั่น ตามลำดับ

การทดสอบ จะทำการวัดค่ารังสีอาทิตย์ (solar radiation) ด้วย Pyranometer (Kipp & Zonen) Model CM 11B ความละเอียด +/-2W/m^2 ทำการวัดอุณหภูมิสารละลาย (T_s) สารดูดซับ (T_{sieve}) ผิวควบแน่น (T_c) และอากาศรอบๆ (T_a) ด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K ซึ่งมีความละเอียด +/-0.5^{o}C บันทึกข้อมูลค่ารังสีและอุณหภูมิการทดลอง ทุกๆ 1 นาที โดยใช้ Data logger (Yokogawa) Model MW 100 สารดูดซับที่ใช้จะเป็นโมเลกุลาร์ซีฟ ชนิด 3A (ZEOCHEM Z3-03) ขนาด 2.5-5.0 mm ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 250^{o}C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง

2. วิธีดำเนินการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์ เทียบกับระบบแยกไอน้ำจากสารผสม โดยสารดูดซับในกระบวนการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์ ซึ่งทำงานแบบไม่ต่อเนื่อง (batch operation) สามารถแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ การทดลองสภาวะจำลองเบื้องต้น และ การทดลองระบบด้วยรังสีอาทิตย์ มีรายละเอียดการทดสอบดังนี้

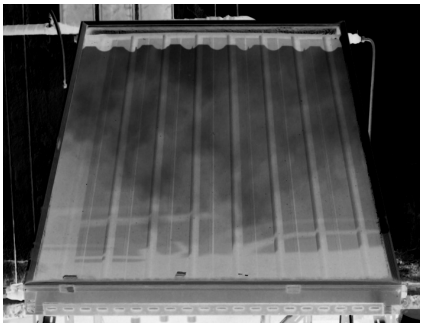
ขั้นตอนที่ 1: การทดลองสภาวะจำลองเบื้องต้น เป็นการทดลองขั้นต้น เพื่อศึกษาตัวแปรของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น และปริมาณสารดูดซับ ที่ส่งผลต่อความเข้มข้นของเอทานอลที่กลั่นได้ เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการออกแบบการทดลองร่วมกับรังสีอาทิตย์ต่อไป โดยทดสอบการกลั่นสารละลายปริมาตร 2.5 ลิตรที่ความเข้มข้น 6 ระดับ คือ 10, 30, 40, 70, 80 และ 95%v/v ตามลำดับ ในถังกลั่นต้นแบบขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร บรรจุโมเลกุลาร์ซีฟ ในถาดดูดซับ (fixed bed) จำนวน 100, 300 และ500 กรัม โดยใช้ฮีตเตอร์ไฟฟ้า (hot plate stirrer) ตั้งอุณหภูมิที่ 120^{o}C และกวนที่ 500 รอบต่อนาที เป็นแหล่งความร้อน เป็นเวลา 180 นาที วัดปริมาตร ความเข้มข้นของผลผลิตที่ได้ และบันทึกมวลสารดูดซับหลังจากดูดซับ ตามลำดับ เพื่อทดสอบความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้เทคนิคดังกล่าวทำงานร่วมรังสีอาทิตย์ บนตัวแปรของความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ที่ได้ ดังแสดงรายละเอียดในรูปที่ 2



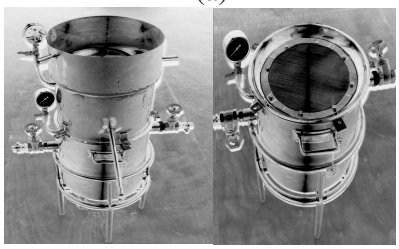
รูปที่ 2 ถังกลั่นต้นแบบขนาดเล็กในระบบแยกไอน้ำจากสารผสมเอทานอล-น้ำ

นอกจากนี้มีการทดลองเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการแยกของระบบที่ใช้โมเลกุลาร์ซีฟชนิด 3A จำนวน 300 กรัม ที่อบคืนสภาพ ที่อุณหภูมิ 250^{o}C, 100^{o}C และอบด้วยตู้อบรังสีอาทิตย์ [28] ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 30, 40, 70, 80 และ 95%v/v ตามลำดับ

ขั้นตอนที่ 2: การกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์ โดยในกระบวนการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์ จะใช้ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบขนาด 2 ตารางเมตร เป็นแหล่งความร้อนให้สารละลายในถัง ที่ป้อนเข้าตัวเก็บรังสีเพื่อรับความร้อน และไหลกลับเข้าที่ถังอีก



(a)



(b)

รูปที่ 3 (a) ตัวเก็บรังสีอาทิตย์แบบแผ่นราบ; (b) ถังกลั่นเอทานอลในระบบแยกไอน้ำจากสารผสมเอทานอล-น้ำ

สารละลายเอทานอล-น้ำปริมาตร 10 ลิตร ในถังต้มกลั่นขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28 เซนติเมตร ที่มีส่วนระเหย (ผิวสารละลาย) และควบแน่น (ส่วนระบายความร้อนบนฝาถังกลั่น) อยู่ในชุดเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 2000 กรัม โดยพิจารณาร่วมกับข้อมูลจากการทดลองในขั้นตอนที่ 1 ประกอบ (สารดูดซับ>500 กรัมต่อสารละลาย 2.5 ลิตร เป็นปริมาณมากที่สุดที่ไอของสารผสมสามารถลอยขึ้นและไหลผ่านชั้นดูดซับได้เอง) ติดตั้งระหว่างส่วนระเหยและควบแน่น การทดสอบจะศึกษาการแยกเอทานอลออกจากสารผสม(เอทานอล-น้ำ) เทียบกับระบบปกติที่ไม่ใช้โมเลกุลาร์ซีฟในการดูดซับ โดยทำการทดสอบที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 4 ระดับ คือ ประมาณ 10, 30, 70 และ 80%v/v ตามลำดับ การทดสอบดำเนินการในช่วงเวลา 9:00-15:00 น.

4. ผลการทดลอง

ขั้นตอนที่ 1: การทดลองสภาวะจำลองเบื้องต้น จากการทดลองกลั่นสารละลายเอทานอลความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 30, 40, 70, 80 และ 95%v/v ที่ปริมาณสารดูดซับ 100, 300 และ 500 กรัม ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 1

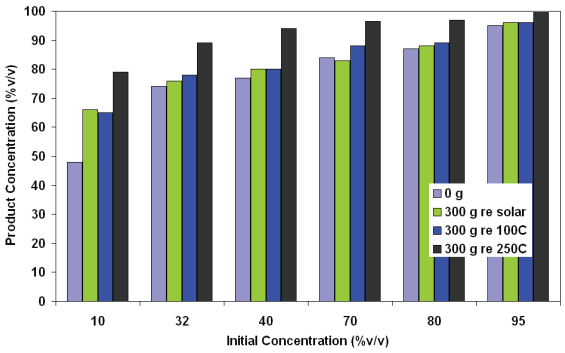
ตารางที่ 1 ความเข้มข้น และปริมาณสารละลายที่ได้จากการกลั่นสารละลายปริมาตร 2.5 ลิตร โดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 100, 300 และ 500 กรัม เป็นสารดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

sieves 0 g				
initial (%v/v)	product (%v/v)	vol (mL)	ethanol (mL)	water (mL)
10	48.0	175	84.00	91.00
32	74.0	286	211.64	74.36
40	77.0	275	211.75	63.25
70	84.0	278	233.52	44.48
80	87.0	181	157.47	23.53
95	95.0	101	95.95	5.05
sieves 100 g				
initial (%v/v)	product (%v/v)	vol (mL)	ethanol (mL)	water (mL)
10	67.0	86	57.62	28.38
32	79.0	92	72.68	19.32
40	82.0	108	88.56	19.44
70	88.0	116	102.08	13.92
80	91.0	116	105.56	10.44
95	98.0	122	119.56	2.44
sieves 300 g				
initial (%v/v)	product (%v/v)	vol (mL)	ethanol (mL)	water (mL)
10	79.0	46	36.34	9.66
32	89.0	63	56.07	6.93
40	94.0	55	51.70	3.30
70	99.0	76	75.24	0.76
80	99.0	100	99.00	1.00
95	99.0	123	121.77	1.23
sieves 500 g				
initial (%v/v)	product (%v/v)	vol (mL)	ethanol (mL)	water (mL)
10	95.0	30	28.50	1.50
32	97.0	33	32.01	0.99
40	97.0	46	44.62	1.38
70	99.0	63	62.37	0.63
80	99.0	66	65.34	0.66
95	99.8	107	106.79	0.21

พบว่าความเข้มข้นของเอทานอลที่กลั่นได้ เพิ่มขึ้นตาม ความเข้มข้นเริ่มต้น และปริมาณสารดูดซับที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่ใช้สารดูดซับ ระบบที่ใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 500 กรัม สามารถเพิ่มความเข้มข้นสารละลายได้สูงที่สุด โดยได้ความเข้มข้นเท่ากับ 95, 97, 97, 99, 99 และ 99.8%v/v ตามลำดับ อย่างไรก็ตามแม้ว่าปริมาณสารดูดซับเป็นปัจจัยต่อความจุในการดูดซับไอน้ำ ความหนาของสารดูดซับที่ 100, 300 และ 500 กรัม ซึ่งมีค่า 1, 2.5 และ

4 เซนติเมตรของชั้นดูดซับ ส่งผลให้ไอน้ำมีพื้นที่ และระยะเวลาในการดูดซับ กับผิวสารดูดซับเพิ่มขึ้น ก่อให้ความดันตกคร่อมที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณสารดูดซับ ทำให้ปริมาณการกลั่นเอทานอลโดยรวมลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นสูงขึ้น

สำหรับการทดลองเพื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของเอทานอลที่กลั่นได้ โดยโมเลกุลาร์ซีฟ (300 กรัม) ที่อบคืนสภาพที่อุณหภูมิ 250°C, 100°C และอบด้วยตู้อบรังสีอาทิตย์ (6 ชั่วโมง) หรือประมาณ 25%(d.b.) พบว่าโมเลกุลาร์ซีฟที่ผ่านการอบคืนสภาพที่อุณหภูมิ 100°C และรังสีอาทิตย์ ไม่สามารถเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลที่กลั่นได้ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น >30%v/v ขึ้นไป โดยมีค่าต่ำกว่าการใช้โมเลกุลาร์ซีฟ ที่อบคืนสภาพที่อุณหภูมิ 250°C ซึ่งความเข้มข้นที่กลั่นได้มีค่าใกล้เคียงกับการกลั่นปกติ (ไม่ใช้สารดูดซับ) ดังแสดงในรูปที่ 4 ดังนั้นสามารถประเมินได้ว่าการอบคืนสภาพที่อุณหภูมิต่ำกว่า 250°C ไม่สามารถคืนสภาพสารดูดซับเพื่อนำมาใช้งานใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 4 ความเข้มข้นเอทานอลที่ได้ จากการกลั่นและดูดซับด้วยโมเลกุลาร์ซีฟที่ผ่านการคืนสภาพที่ 250, 100°C และอบด้วยรังสีอาทิตย์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

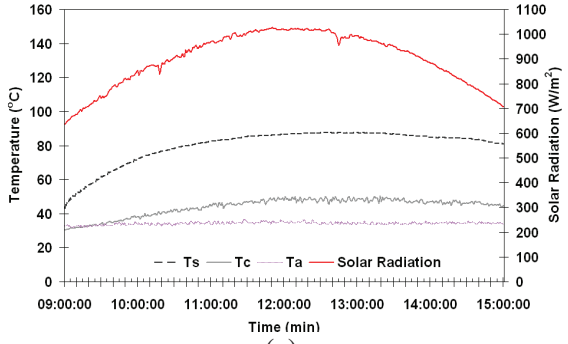
ตารางที่ 2 มวลน้ำที่ระเหย มวลน้ำที่อยู่ในสารละลายที่กลั่นได้ มวลน้ำที่ดูดซับโดยสารดูดซับและประสิทธิภาพการดูดซับน้ำโดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟ 100, 300 และ 500 กรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

Sieves (g)	Equilibrium (g)	H_2O Product (g)	Adsorbed (g)	Eff %
Initial 95%v/v Batch operation with Molecular Sieves 3A				
100	4.85	2.20	2.65	54.70
300	4.85	0.98	3.86	79.70
500	4.85	0.00	4.85	100.00
Initial 80%v/v Batch operation with Molecular Sieves 3A				
100	23.17	10.21	12.96	55.94
300	23.17	0.80	22.37	96.55
500	23.17	0.53	22.64	97.72
Initial 70%v/v Batch operation with Molecular Sieves 3A				
100	43.92	13.69	30.24	68.84
300	43.92	0.61	43.32	98.62
500	43.92	0.50	43.42	98.85
Initial 40%v/v Batch operation with Molecular Sieves 3A				
100	62.70	19.22	43.48	69.34
300	62.70	3.19	59.51	94.91
500	62.70	1.29	61.41	97.95
Initial 32%v/v Batch operation with Molecular Sieves 3A				
100	73.79	19.14	54.65	74.07
300	73.79	6.80	66.98	90.78
500	73.79	0.92	72.86	98.75
Initial 10%v/v Batch operation with Molecular Sieves 3A				
100	90.65	28.21	62.44	68.88
300	90.65	9.57	81.08	89.45
500	90.65	1.44	89.21	98.41

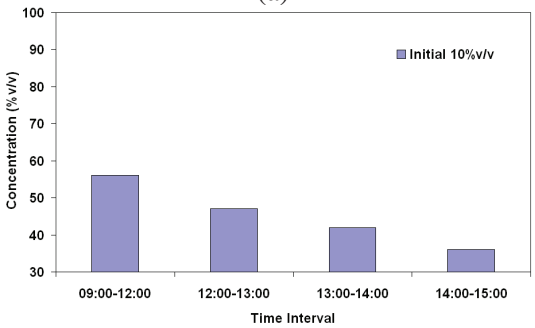
จากข้อมูลในตารางที่ 2 แสดงมวลไอน้ำทั้งหมดที่ถูกดูดซับในช่วงเวลา 3 ชั่วโมง ด้วยโมเลกุลาร์ซีฟ 100, 300 และ 500 กรัม ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ พบว่ามีค่ามากขึ้นตามปริมาณไอน้ำที่มากขึ้น ตามสัดส่วนความเข้มข้นของสารละลาย และแปรตามปริมาณสารดูดซับ

เมื่อคิดเป็นร้อยละเทียบกับระบบกลั่นที่ไม่ใช้สารดูดซับโดยพิจารณาจากปริมาณไอน้ำจาก vapour-liquid equilibrium diagram ในการกลั่นปกติเทียบกับปริมาณน้ำที่มีในสารละลายที่กลั่นได้ สำหรับอ้างอิง พบว่าที่ปริมาณสารดูดซับ 500 กรัมต่อสารละลาย 2.5 ลิตร สามารถดูดซับไอน้ำได้มากที่สุด มีประสิทธิภาพการดูดซับ (E_{ff}) มากว่า 90% ขึ้นไปที่ทุกๆ ความเข้มข้น จึงนำไปทดสอบต่อเนื่องในระบบแยกไอน้ำจากสารผสมโดยสารดูดซับในกระบวนการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์ต่อไป

ขั้นตอนที่ 2: การกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์เทียบกับระบบแยกไอน้ำจากสารผสมเอทานอล-น้ำโดยสารดูดซับในกระบวนการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์

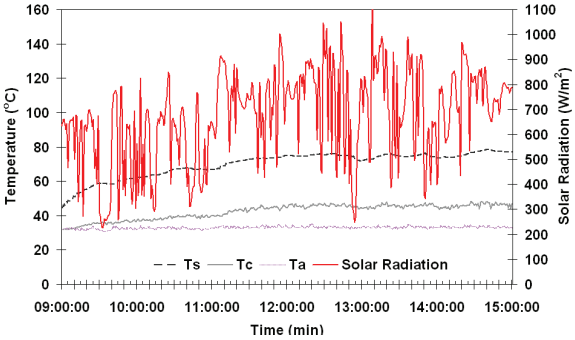


(a)

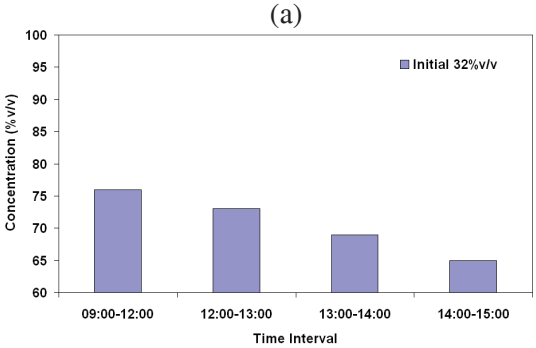


(b)

รูปที่ 5 (a) ค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิต่างๆ; (b) ความเข้มข้นสารละลายที่กลั่นได้กรณีกลั่นเอทานอลความเข้มข้น 10%v/v

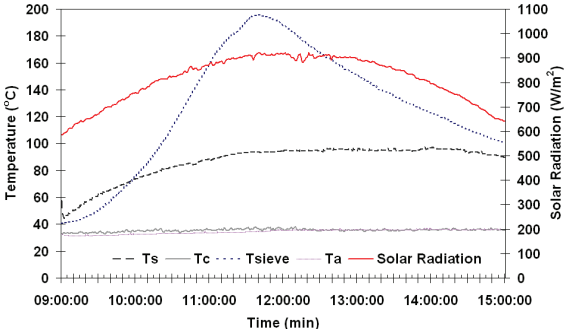


(a)

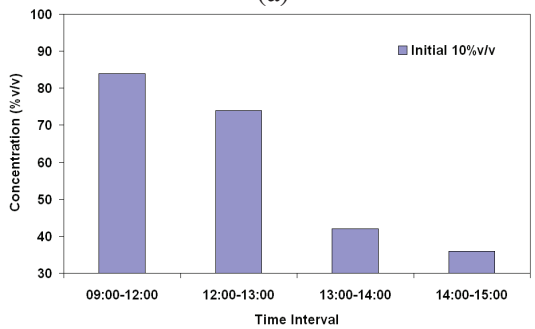


(b)

รูปที่ 7 (a) ค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิต่างๆ; (b) ความเข้มข้นสารละลายที่กลั่นได้กรณีกลั่นเอทานอลความเข้มข้น 32%v/v

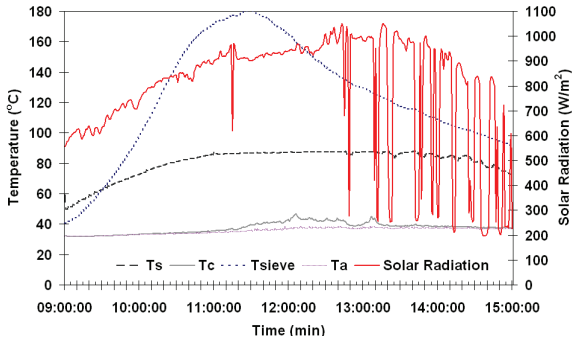


(a)

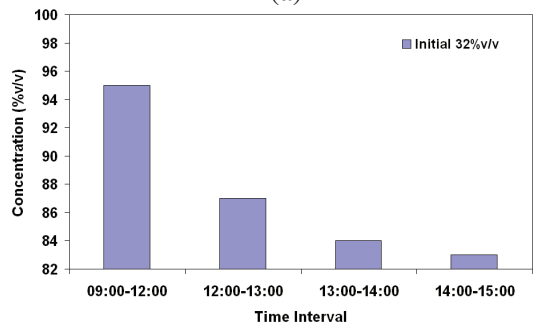


(b)

รูปที่ 6 (a) ค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิต่างๆ; (b) ความเข้มข้นสารละลายที่กลั่นได้ กรณีใช้โมเลกุลาร์ซีฟดูดซับไอน้ำจากการกลั่นเอทานอลความเข้มข้น 10%v/v

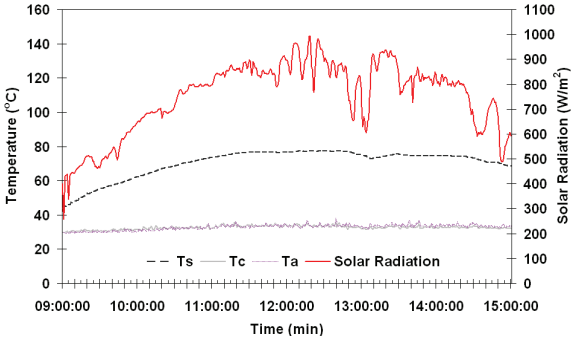


(a)

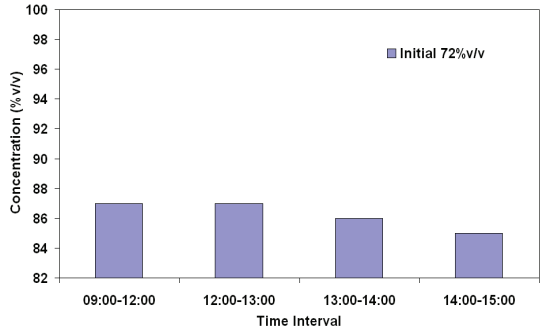


(b)

รูปที่ 8 (a) ค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิต่างๆ; (b) ความเข้มข้นสารละลายที่กลั่นได้กรณีใช้โมเลกุลาร์ซีฟดูดซับไอน้ำจากการกลั่นเอทานอลความเข้มข้น 32%v/v

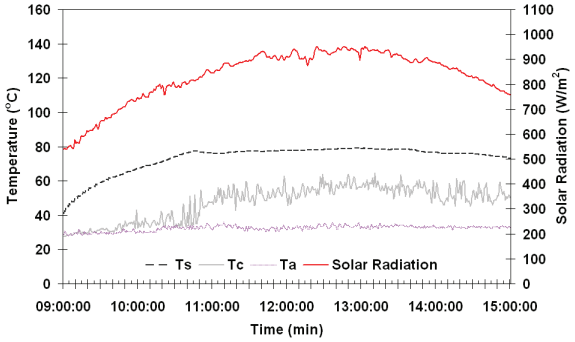


(a)

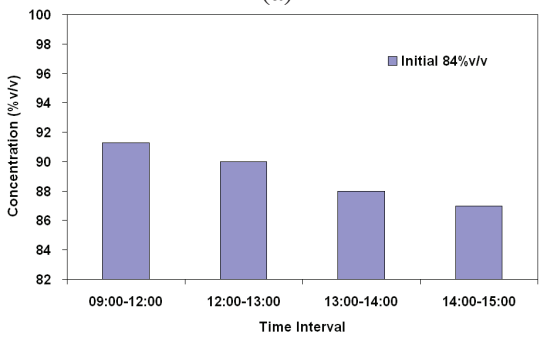


(b)

รูปที่ 9 (a) ค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิต่างๆ; (b) ความเข้มข้นสารละลายที่กลั่นได้กรณีกลั่นเอทานอลความเข้มข้น 72%v/v

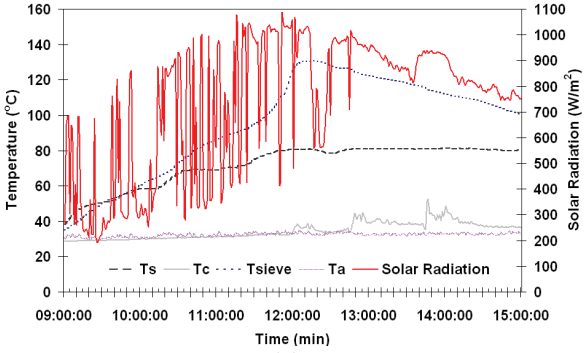


(a)

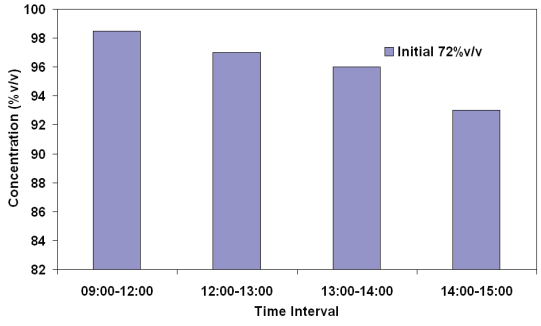


(b)

รูปที่ 11(a) ค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิต่างๆ; (b) ความเข้มข้นสารละลายที่กลั่นได้กรณีกลั่นเอทานอลความเข้มข้น 84%v/v

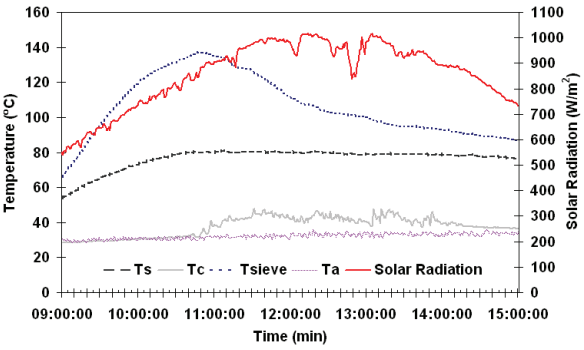


(a)

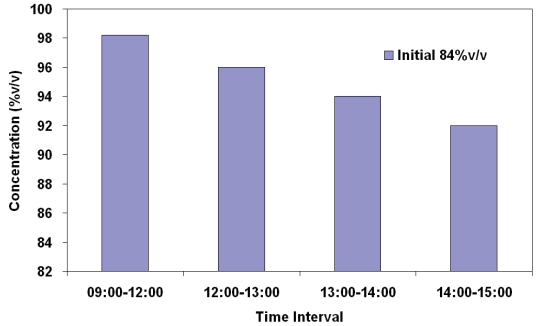


(b)

รูปที่ 10 (a) ค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิต่างๆ; (b) ความเข้มข้นสารละลายที่กลั่นได้กรณีใช้โมเลกุลาร์ซีฟดูดซับไอน้ำจากการกลั่นเอทานอลความเข้มข้น 72%v/v



(a)



(b)

รูปที่ 12 (a) ค่ารังสีอาทิตย์ และอุณหภูมิต่างๆ; (b) ความเข้มข้นสารละลายที่กลั่นได้กรณีใช้โมเลกุลาร์ซีฟดูดซับไอน้ำการกลั่นเอทานอลความเข้มข้น 84%v/v

จากรูปที่ 5-12(a) พบว่าในช่วงเวลา 9:00-12:00น. อุณหภูมิสารละลาย เริ่มเพิ่มสูงขึ้นอย่างช้าๆ จากปัจจัยของค่าความจุความร้อนจำเพาะและความเข้มรังสีอาทิตย์ จนเข้าใกล้อุณหภูมิจุดเดือดของเอทานอลบริสุทธิ์ที่ 78.8°C จากนั้นอุณหภูมิสารละลายจะค่อนข้างคงที่ ในช่วงเวลา 12:00-15:00น.สำหรับกรณีใช้โมเลกุลาร์ซีฟดูดซับน้ำจากเอทานอลความเข้มข้นต่าง ๆ อุณหภูมิสารดูดซับ (T_{sieve}) จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอัตราการดูดซับของน้ำ หรืออัตราการระเหยของไอผสม เอทานอล-น้ำ ซึ่งการดูดซับไอน้ำของโมเลกุลาร์ซีฟจะมีการถ่ายเทความร้อนออก ทำให้ (T_{sieve}) มีค่าสูงขึ้น และลดลงเมื่อไอน้ำผ่านน้อยลง หรือโมเลกุลาร์ซีฟเริ่มมีประสิทธิภาพการดูดซับลดลง เมื่อไอน้ำสะสมในสารดูดซับมากขึ้นจนเข้าสู่สภาวะอิ่มตัว ส่งผลให้ปริมาณไอน้ำที่ถูกดูดซับลดลงอุณหภูมิสารดูดซับ (T_{sieve}) ลดลง ตามลำดับ ซึ่งส่งผลถึงความเข้มข้นและปริมาณเอทานอลที่กลั่นได้ การทดลองได้ใช้ความเข้มข้นเอทานอล 4 ระดับ คือประมาณ 10, 30, 70 และ80%v/v ตามลำดับ สามารถแบ่งผลการทดลองเป็น 2 ส่วนคือ ช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำ (10-32%v/v) และช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นสูง (72-84%v/v) ตามลำดับ

จากรูปที่ 5-12(b) ความเข้มข้นสารละลายที่กลั่นได้กรณีไม่ใช้โมเลกุลาร์ซีฟ และใช้โมเลกุลาร์ซีฟ พบว่าความเข้มข้นของสารละลายที่กลั่นได้ทั้ง 2 กรณี มีค่าความเข้มข้นที่สูงมากในช่วงต้นของกระบวนการกลั่น แปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่ทดสอบ และเมื่ออุณหภูมิสารละลายเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณไอน้ำและเอทานอลที่ระเหยขึ้นมาและกลั่นตัว ในสารละลายเพิ่มขึ้น โดยเอทานอลระเหยได้มากกว่าไอน้ำในช่วงแรก จากสมบัติของจุดเดือดที่ต่างกัน เมื่อเวลาผ่านไปเอทานอลในสารละลายมีสัดส่วนหรือความเข้มข้นลดลงตามลำดับ ส่งผลให้ปริมาณเอทานอลที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ระเหยได้น้อยลง ในขณะที่ไอน้ำระเหยได้เท่าเดิมหรือมากขึ้นเนื่องจากมีสัดส่วนของน้ำต่อเอทานอลมากขึ้นตามลำดับ (ระบบกลั่นแบบกะ หรือไม่ต่อเนื่อง) ทำให้สารละลายที่กลั่นได้มีความเข้มข้นมีค่าต่ำลง โดยเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบความเข้มข้นในช่วงเวลาต่างๆ ระหว่างการกลั่นเอทานอลเทียบกับระบบแยกไอน้ำจากสารผสมเอทานอล-น้ำโดยสารดูดซับในกระบวนการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์ พบว่าระบบแยกไอน้ำจากสารผสมเอทานอล-น้ำโดยสารดูดซับมีความเข้มข้นในช่วงเวลาต่างๆ และความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์โดยรวมสูงกว่า การกลั่นปกติที่ทุกความเข้มข้นเริ่มต้นดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 3 และ 4 พบว่าที่สารละลายสุดท้าย มีค่าความเข้มข้นเพิ่มขึ้น จากค่าความเข้มข้นเริ่มต้นที่ 10, 32, 72, 84%v/v เพิ่มเป็นประมาณ 48.6, 72.3, 86.5, 89.7%v/v และเพิ่มเป็น 74.4, 89.4, 97.0, 96.3%v/v สำหรับการกลั่นเอทานอลปกติ และการใช้สารดูดซับในการกลั่นเอทานอลตามลำดับ

จากข้อมูลความเข้มข้น และปริมาตรผลิตภัณฑ์ที่กลั่นได้ในช่วงเวลาต่างๆ และปริมาตรผลิตภัณฑ์โดยรวม ในตารางที่ 3 และ 4 พบว่าปริมาณสารละลายที่กลั่นได้ แปรผันตามความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น โดยสารละลายความเข้มข้นเริ่มต้นสูง สามารถกลั่นสารละลายได้ปริมาณที่มากกว่าความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำกว่าที่สภาวะเดียวกัน โดยแปรผันตามค่ารังสีอาทิตย์ในการทดลองนั้นๆ นอกจากนี้ปริมาณสารละลายที่กลั่นได้จากระบบที่ใช้โมเลกุลาร์ซีฟดูดซับไอน้ำ ต่ำกว่าระบบกลั่นปกติที่ทุกๆ ความเข้มข้นเริ่มต้น เนื่องจากการติดตั้งถาดดูดซับระหว่างส่วนระเหยและควบแน่น ส่งผลให้มีความต้านทานไหลของการระเหยของสารผสมมากขึ้น ส่งผลให้ไอผสมผ่านชั้นดูดซับได้น้อยลง และเป็นปัจจัยให้เกิดการดูดซับระหว่างไอผสมกับผิวสารดูดซับ ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการกลั่นเอทานอลปกติเทียบกับการใช้สารดูดซับในการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์ ที่ความเข้มข้น (10-32%v/v)

Non-Molecular Sieve 3A (10%v/v)			
19.4 MJ/m"-Batch	Initial Concentration 10%v/v Volume 10 lites		
Time Interval	Product (%v/v)	Product (cc.)	Pure Ethanol (cc.)
09:00-12:00	56.0	1265	708
12:00-13:00	47.0	550	259
13:00-14:00	42.0	500	210
14:00-15:00	36.0	410	148
Total	**48.6**	**2725**	**1325**
Molecular Sieve 3A 2000g (10%v/v)			
17.5 MJ/m"-Batch	Initial Concentration 10%v/v Volume 10 lites		
Time Interval	Product (%v/v)	Product (cc.)	Pure Ethanol (cc.)
09:00-12:00	84.0	270	227
12:00-13:00	74.0	140	104
13:00-14:00	42.0	50	21
14:00-15:00	36.0	20	7
Total	**74.7**	**480**	**359**
Non-Molecular Sieve 3A (32%v/v)			
14.5 MJ/m"-Batch	Initial Concentration 32%v/v Volume 10 lites		
Time Interval	Product (%v/v)	Product (cc.)	Pure Ethanol (cc.)
09:00-12:00	76.0	1390	1056
12:00-13:00	73.0	750	548
13:00-14:00	69.0	550	380
14:00-15:00	65.0	550	358
Total	**72.3**	**3240**	**2341**
Molecular Sieve 3A 2000g (32%v/v)			
17.1 MJ/m"-Batch	Initial Concentration 32%v/v Volume 10 lites		
Time Interval	Product (%v/v)	Product (cc.)	Pure Ethanol (cc.)
09:00-12:00	95.0	385	366
12:00-13:00	87.0	400	348
13:00-14:00	84.0	155	130
14:00-15:00	83.0	50	42
Total	**89.4**	**990**	**885**

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการกลั่นเอทานอลปกติเทียบกับการใช้สารดูดซับในการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์ ที่ความเข้มข้น (72-84%v/v)

Non-Molecular Sieve 3A (72%v/v)			
16.2 MJ/m"-Batch	Initial Concentration 72%v/v Volume 10 lites		
Time Interval	Product (%v/v)	Product (cc.)	Pure Ethanol (cc.)
09:00-12:00	87.0	1890	1644
12:00-13:00	87.0	1000	870
13:00-14:00	86.0	940	808
14:00-15:00	85.0	700	595
Total	**86.5**	**4530**	**3918**
Molecular Sieve 3A 2000g (72%v/v)			
15.9 MJ/m"-Batch	Initial Concentration 72%v/v Volume 10 lites		
Time Interval	Product (%v/v)	Product (cc.)	Pure Ethanol (cc.)
09:00-12:00	98.5	890	877
12:00-13:00	97.0	450	437
13:00-14:00	96.0	370	355
14:00-15:00	93.0	250	233
Total	**97.0**	**1960**	**1901**
Non-Molecular Sieve 3A (84%v/v)			
18.0 MJ/m"-Batch	Initial Concentration 84%v/v Volume 10 lites		
Time Interval	Product (%v/v)	Product (cc.)	Pure Ethanol (cc.)
09:00-12:00	91.3	2600	2374
12:00-13:00	90.0	1250	1125
13:00-14:00	88.0	1250	1100
14:00-15:00	87.0	900	783
Total	**89.7**	**6000**	**5382**
Molecular Sieve 3A 2000g (84%v/v)			
18.6 MJ/m"-Batch	Initial Concentration 84%v/v Volume 10 lites		
Time Interval	Product (%v/v)	Product (cc.)	Pure Ethanol (cc.)
09:00-12:00	98.2	1150	1129
12:00-13:00	96.0	750	720
13:00-14:00	94.0	510	479
14:00-15:00	92.0	170	156
Total	**96.3**	**2580**	**2485**

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นจากการกลั่นปกติ (Normal) จากสมดุลไอน้ำ-เอทานอล ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 10, 32, 72 และ 84%v/v พบว่าสามารถเพิ่มความเข้มข้นเอทานอลสูงสุดไม่เกิน 54, 74, 84 และ 87%v/v ตามลำดับ เมื่อเทียบกับเอทานอลที่กลั่นได้จากระบบแยกไอน้ำจากสารละลายโดยสารดูดซับในกระบวนการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์ พบว่าสามารถลดขั้นตอนการกลั่น สำหรับผลิตเอทานอลความเข้มข้น มากกว่า 90%v/v ขึ้นไป

5. สรุป

จากการทดสอบการเพิ่มความเข้มข้นการกลั่นสารผสมเอทานอล-น้ำโดยสารดูดซับในกระบวนการกลั่นเอทานอลด้วยรังสีอาทิตย์ โดยใช้โมเลกุลาร์ซีฟ ชนิด 3A สามารถแยกไอน้ำออกจากไอผสม และสามารถเพิ่มความเข้มข้นของเอานอลได้มากกว่า 90%v/v ซึ่งเป็นข้อจำกัดของระบบกลั่นแบบไม่ต่อเนื่อง ทำให้สามารถลดขั้นตอนการกลั่นแบบไม่ต่อเนื่องลงได้ สำหรับการกลั่นเอทานอลเริ่มต้นประมาณ 30, 70 และ 80%v/v ตามลำดับ โดยปริมาณสารดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายเป็นปัจจัยต่อระยะเวลาในการดูดซับระหว่างไอผสมกับผิวสารดูดซับ ดังนั้นการออกแบบระบบให้มีแรงขับดันมากขึ้น เพื่อให้ไอผสมไหลผ่านชั้นดูดซับที่มีความหนาแน่นสูง ซึ่งทำให้ระบบสามารถใช้ปริมาณสารดูดซับได้มากขึ้น และเพิ่มระยะเวลาในการดูดซับระหว่างไอผสมกับผิวสารดูดซับ

ในขณะที่อุณหภูมิการอบคืนสภาพสารดูดซับ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 250°C ไม่สามารถคืนสภาพสารดูดซับเพื่อนำมาใช้งานใหม่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีแนวโน้มที่สามารถประยุกต์ใช้ความร้อนรังสีอาทิตย์มาช่วยในการอบคืนสภาพโมเลกุลาร์ซีฟ 3A ได้ในลักษณะการอบไล่ความชื้นขั้นต้น ก่อนอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่ำกว่า 250°C ต่อ โดยใช้พลังงานโดยรวมลดลง

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย

เอกสารอ้างอิง

[1] Rabelo, S.C., Carrere, H., Filho, R.M. and Costa, A.C. Production of bioethanol, methane and heat from sugarcane bagasse in a biorefinery concept. *Bioresource Technol*, September 2011; 102(17): 7887–7895.

[2] Sarkar, N., Ghosh, S.K., Bannerjee, S., Aikat, K. Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. *Renew. Energy*, January 2012; 37(1), 19–27.

[3] Jacques, K.A., Lyons, T.P., Kelsall, D.R. The Alcohol Textbook. *Nottingham University Press: Nottingham*; U.K, 2003.

[4] de Filippi, R.P. and Moses, J.M. Extraction of organics from aqueous solutions using critical-fluid carbon dioxide. *Biotechnol. Bioeng. Symp*, January 1982; 12: 205–219.

[5] Leeper, S.A., Wankat, P.C. Gasohol production by extraction of ethanol from water using gasoline as solvent. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, April 1982; 21(2): 331–334.

[6] Errico, M. and Rong, B. Synthesis of new separation processes for bioethanol production by extractive distillation. *Sep. Purif. Technol.*, August 2012; 96: 58–67.

[7] Rao, M.B. and Sircar, S. Production of motor fuel grade alcohol by concentration swing adsorption. *Sep. Sci. Technol*., 1992; 27(14): 1875–1887.

[8] Yamamoto, T., Kim, Y.H., Kim, B.C., Endo, A., Thongprachan, N. and Ohmori, T. Adsorption characteristics of zeolites for dehydration of ethanol: evaluation of diffusivity of water in porous structure. *Chem. Eng. J*., 2012; 181–182: 443–448.

[9] Delgado, J.A., Agueda, V.I., Uguina, M.A., Sotelo, J.L., Garcia, A., Brea, P. and Garcia-Sanz, A. Separation of ethanol–water liquid mixtures by adsorption on a polymeric resin Sepabeads 207. *Chemical Engineering Journal*, March 2013; 220: 89–97.

[10] Ikegami, T., Yanagishita, H., Kitamoto, D., Negishi, H., Haraya, K. and Sano, T. Concentration of fermented ethanol by pervaporation using silicalite membranes coated with silicone rubber. *Desalination*, September 2002; 149: 49–54.

[11] Verhoef, A., Figoli, A., Leen, B., Bettens, B., Drioli, E. and Van der Bruggen, B. Performance of a nanofiltration membrane for removal of ethanol from aqueous solutions by pervaporation. *Sep. Purif. Technol.,* April 2008; 60(1): 54–63.

[12] Chovau, S., Gaykawad, S., Straathof, A.J.J., Van der Bruggen, B. Influence of fermentation by-products on the purification of ethanol from water using pervaporation. *Bioresource Technol.*, January 2011; 102(2): 1669–1674.

[13] Ivanova, E. and Karsheva, M. Ethanol vapours adsorption by natural clynoptilolite. *J. Univ. Chem. Technol. Metall.,* 2007; 42(4): 391–398.

[14] Jeong, J., Jeon, H., Ko, K., Chung, B. and Choi, G. Production of anhydrous ethanol using various PSA (Pressure Swing Adsorption) processes in pilot plant. *Renew.Energy*., June 2012; 42: 41–45.

[15] Beery, K.E. and Ladisch, M.R. Adsorption of Water from Liquid-Phase Ethanol-water Mixtures at Room Temperature Using Starch-Based Adsorbents. *Ind. Eng. Chem. Res*, June 2001; 40: 2112-2115.

[16] Chang, H., Yuan, X., Tian, H. and Zeng, A. Experiment and Prediction of Breakthrough Curves for Packed Bed Adsorption of Water Vapor on Cornmeal, *Chemical Engineering and Processing,* March 2006; 45: 747-754.

[17] Breck, D.W. Zeolite Molecular Sieves: Structure Chemistry and Use. *Robert E. Krieger. Publishing Company: Malabar*, Florida; U.S, 1984.

[18] Carmo, M.J. and Gubulin, J.C. Ethanol-Water Adsorption on Commercial 3A Zeolites: Kinetic and Thermodynamic Data. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, September 1997; 14(3): 217-224.

[19] Salem, M. and Shebil, B. Effect of heat of adsorption on the adsorptive drying of solvents at equilibrium in a packed bed of zeolite. *Chemical Engineering and Processing*, July 1999; 74: 197-204.

[20] Vorayos, N., Kiatsiriroat, T. And Vorayos, N. Performance analysis of solar ethanol distillation. *Renewable Energy*, March 2006; 31: 2543–2554.

[21] Meukam, P., Njomo, D., Gbane, A. And Toure, S. Experimental optimization of a solar still:application to alcohol distillation. *Chemical Engineering and Processing*, May 2004; 43: 1569–1577.

[22] Tiwari, G.N., Singh, H.N. and Tripathi, R. Present status of solar distillation. *Solar Energy*, 2003; 75: 367-363.

[23] Toure, S., Salami, H. And Pierre, M. Theoretical and experimental studies of a solar still type suitable for alcoholic distillation. *Renew Energy,* 1999; 16(1–4): 739–742.

[24] Siangsukone, P., Jareanjit, J., Therdyothin, A., Tia, W., Wongwailikit, K. and Tiansuwan J. The Development of Solar Ethanol Distillation for Thai Local Community. *The 8th Asean Science and Technology Week Scientific and Technical Conferences*, 2008, Pasay City, Philippines.

[25] Jareanjit, J., Siangsukone, P., Therdyothin, A., Tia, W., Wongwailikit, K. and Tiansuwan, J. Modification of Thai Local Brewery Tank for a Large Scale Solar Ethanol Distillation Plant. *International Workshop on Advanced Material for New and Renewable Energy,* Ancol, 2009, Jakarta, Indonesia.

[26] อติพงศ์ นันทพันธุ์ ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ และ ณัฐวุฒิ ดุษฎี. การประหยัดพลังงานในเตาอบแห้งลำไยโดยการลดความชื้นของอากาศสำหรับห้องเผาไหม้. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, ฉบับที่ 13 (1), มกราคม-เมษายน 2549, หน้า 8-18.

[27] อาทิตย์ เพียรงาม นเรศ มีโส และ ศิริธร ศิริอมรพรรณ. การปรับปรุงประสิทธิภาพของโรงอบแห้งโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ร่วมกับกระบวนการดูดซับความชื้นอากาศอบแห้ง. *วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่* ฉบับที่ 20(3), กันยายน-ธันวาคม 2556, หน้า 64-73.

[28] Jareanjit, J., Boonyanuwat, S. and Tongchom S. Performance of Adsorbent Regeneration by Solar Dryer and Moisture Condensing Cabinet. *26th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT 26), 2012*, Chiang Rai**,** Thailand. (In Thai).

[29] Perry, R.H. and Grenn, D.W. Perry's Chemical Engineers' Handbook. McGraw-Hill: New York, 1984.

[30] Duffie, J.A. and Beckman, W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley and Sons: New York, 1991.